

农用柔性底盘模式切换控制参数试验与优化

瞿济伟¹ 郭康权^{1,2} 李翊宁¹ 宋树杰³ 高 华¹ 周 伟¹

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100; 2. 陕西省农业装备工程技术研究中心, 陕西杨凌 712100;
3. 陕西师范大学食品工程与营养科学学院, 西安 710119)

摘要: 为了探索四轮独立驱动与转向农用柔性底盘模式切换的最佳工作参数,利用自制柔性底盘试验台,设计了二元二次通用旋转组合试验,以转向电桥步进电机转速与电磁摩擦锁锁紧电压为试验因素,应用熵值法,将底盘所受纵向力、横向力、转矩及偏置臂转角误差4个指标,构建成为模式切换效果综合评价指标,测试了2种因素对横行与原地回转2种模式切换效果的影响,通过 Design-Expert 8.0 建立了综合指标与2个因素的回归方程,采用响应面法得出了2种模式切换控制参数的最优组合并进行了试验验证。试验结果表明,2个因素及其交互作用对综合评价指标均具有极显著影响($P < 0.01$);横行与原地回转模式切换时转速和电压最优组合分别为 81 r/min、4.60 V 和 91 r/min、4.41 V;优化组合下模型计算值与试验值最大相对误差为 4.73%。

关键词: 农用柔性底盘; 模式切换; 控制参数; 试验; 优化

中图分类号: S229+.1; U463.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)09-0346-07

Experiment and Optimization of Mode Switching Controlling Parameters for Agricultural Flexible Chassis

QU Jiwei¹ GUO Kangquan^{1,2} LI Yining¹ SONG Shujie³ GAO Hua¹ ZHOU Wei¹

(1. School of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
2. Shaanxi Agricultural Equipment Engineering Technology Research Center, Yangling, Shaanxi 712100, China
3. College of Food Engineering and Nutritional Science, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China)

Abstract: Agricultural flexible chassis is a kind of vehicle with four-wheel independent steering and four-wheel independent driving. There are four special motion modes of this chassis, including straight motion, cross motion, diagonal motion and in-place rotation. Each motion is achieved by controlling the steering stepper motor and the electromagnetic friction lock. For exploring the best controlling parameters of mode switching (MS), a binary quadratic rotation combination test was conducted by using a self-made flexible chassis test bench. The speed of the steering stepper motor and the locking voltage of the electromagnetic friction lock were selected as two factors in the test. The entropy method was then used to establish comprehensive evaluation index (CEI) for MS effect integrating the longitudinal force, lateral force, torque of chassis and the angle error of the off-centered arm. Analyses were presented about the influence of two factors on MS effect for the cross motion mode and the in-place rotation mode meanwhile. The regression equation of the CEI and the two factors was also established by Design-Expert 8.0. The optimal combinations of controlling parameters for these two modes were afterwards obtained by using response surface methodology and finally validated by experiments. The results showed that these two factors and their interactions had extremely significant influence on the CEI ($P < 0.01$). The optimal combination of rotation speed and voltage for these two modes was 81 r/min, 4.60 V and 91 r/min, 4.41 V, respectively. The maximum relative error between the calculated and experimental values of the CEI was 4.73%. These conclusions can provide references for the study about motion control of agricultural electric chassis.

Key words: agricultural flexible chassis; mode switching; controlling parameters; experiment; optimization

收稿日期: 2018-04-18 修回日期: 2018-05-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(51375401)

作者简介: 瞿济伟(1989—),男,博士生,主要从事智能农业装备技术研究,E-mail: qujiwei_mail@foxmail.com

通信作者: 郭康权(1955—),男,教授,博士生导师,主要从事智能农业装备技术研究,E-mail: jdkgk@nwsuaf.edu.cn

0 引言

我国温室、农产品仓储及果园等农业作业环境,空间狭闭且环境复杂,机械作业要求较高,目前机械化水平急需提升,发展灵活、环保、高效与智能化的农机是提升其机械化作业水平的关键^[1-3]。

目前,应用于上述狭闭及复杂作业环境的农业机械主要包括农用电动车^[4]、轮式机器人^[5-7]及各种形式的移动平台或者底盘^[8-9]等。在国内,文献^[10]研究的线控四轮独立驱动与转向轮式移动小车,转向形式多且智能程度很高,但转向系统与驱动系统仍分离,控制难度较大;文献^[11]研发的温室电动自走式收获机虽在狭闭空间有很高的作业质量和效率,但沿固定轨道行驶使其对作业环境要求较高;文献^[12]通过有限元模态分析方法较大地轻简化了山地果园运输机,但传统拖拉机底盘结构对运动形式有所限制。国外对于狭闭空间农业机械研究较早,且注重运动控制算法的开发和路径规划设计等^[13-15],但研究仍主要采用内燃机动力及机械液压转向或机电液转向系统^[16],环保与灵活性受到一定限制。

课题组前期研究的四轮独立驱动与转向电动农用柔性底盘将驱动与转向系统合二为一,更加简化了结构,可在温室等狭闭环境实现直行、横行、斜行及原地回转等特殊运动模式^[17],兼具低碳环保和灵活优势。然而,课题组前期主要设计了样机及其控制系统^[18],并研究了固定姿势时的动力学特性^[19],特殊模式下的控制性能仍需探索,本文在前期研制的柔性底盘样机及试验台^[20]基础上,针对轮毂电机驱动轮和电磁摩擦锁的控制参数进行试验,探索各参数对模式切换受力稳定性及切换精度的影响,以期优化特殊模式切换的效果,为农用柔性底盘推广应用提供保障。

1 结构特点与工作原理

柔性底盘整体结构如图1所示,其主要由4个偏置转向轴结构组成,该结构包括偏置轴、电磁摩擦锁、偏置臂以及轮毂电机驱动轮等。底盘的各种运动,通过中央控制器对电磁摩擦锁锁紧力矩控制电压(简称锁紧电压)和轮毂电机驱动轮转速的调节来实现;若将锁紧电压控制为24 V额定电压,则驱动轮加速时不能绕偏置轴转动,底盘只能以固定运动形式行进或工作;若锁紧电压降低或为0,则驱动轮加速时能绕偏置轴转动,便可实现转弯或各种特殊模式运动的切换。本文针对特殊模式运动展开研究。

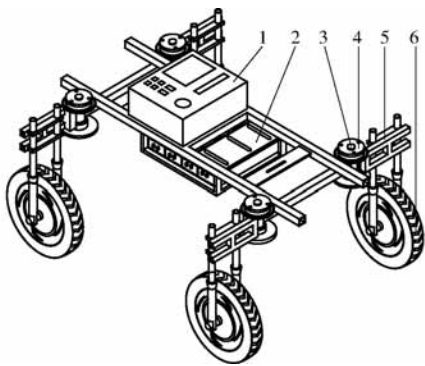


图1 柔性底盘整体结构简图

Fig. 1 Schematic of overall structure for flexible chassis
1. 中央控制器 2. 蓄电池 3. 偏置轴 4. 电磁摩擦锁 5. 偏置臂 6. 轮毂电机驱动轮

柔性底盘模式切换的控制原理及示意图如图2所示。图中R1、R2、R3、R4为位于电桥桥臂上的精密多圈电位器。

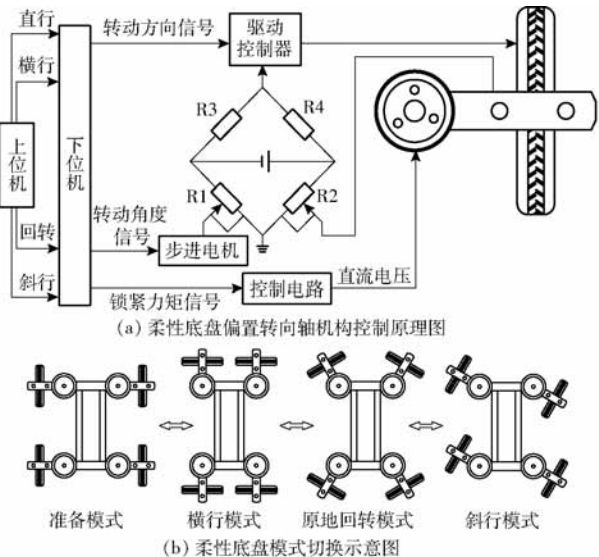


图2 柔性底盘转向控制原理简图及模式切换示意图

Fig. 2 Diagram of steering control system and schematic of mode switching for flexible chassis

当底盘为图2b准备模式时,电磁摩擦锁在额定直流电压下锁紧,驱动轮不能绕偏置轴转动。如图2a所示,当上位机发出模式切换指令后,下位机发出锁紧力矩信号使锁紧电压降低,并由转动方向信号控制轮毂电机正反转,然后转动角度信号发出,转向电桥^[21]步进电机以一定转速开始转动,使驱动轮跟踪转向直至目标角度,实现图2b的各种运动模式,可见模式切换实质上由锁紧电压与步进电机转速控制。因此,需明确二者对模式切换的影响并进行参数综合寻优,以保证良好的模式切换效果。横行、原地回转是柔性底盘两种主要特殊工作模式,且斜行及软化路面情况十分复杂,后续将单独研究,故本文只针对硬化路面上横行和原地回转两种模式进行研究。

2 模式切换过程控制参数分析

2.1 电磁摩擦锁锁紧电压

电磁摩擦锁锁紧电压 U 为 $0 \sim 24\text{ V}$, 且其锁紧力矩 M_z 与 U 之间关系为^[19]

$$M_z = KU \tag{1}$$

式中 K ——常数

试验发现, 采用电桥跟踪转向时, U 若高于 8 V 则偏置臂因 M_z 太大而转不到目标位置, 若低于 2 V 则因 M_z 太小使转角有较大超调量。可见, 为保持较好的偏置臂转向精度, U 需在 $2 \sim 8\text{ V}$ 之间。

2.2 转向电桥步进电机转速

由于轮毂电机启动需一定时间 t_0 , 步进电机转速 n 若低于 15 r/min , 则电桥输出电压变化太慢, 轮毂电机出现一走一停现象, 若高于 180 r/min 则步进电机转到位后轮毂电机还未启动, 因此 n 需在 $15 \sim 180\text{ r/min}$ 内。已知电桥输入电压 U_e 和输出电压 U_s 之间关系为^[19]

$$U_s = \frac{\theta - \alpha}{2 \times 360^\circ + 2(\theta + \alpha)} U_e \tag{2}$$

由于 t_0 时间内 α 一直为零, 即 $\theta = 2 \times 180^\circ nt_0$, 依据电桥原理及式(2), 可得 t_0 时间内因步进电机转动造成的电桥输出电压 U_{s0} 为

$$U_{s0} = \frac{2nt_0}{10 + 2nt_0} \tag{3}$$

式中 θ ——图 2a 中电位器 R1 转角即步进电机转角, $(^\circ)$

α ——偏置臂处电位器 R2 转角, $(^\circ)$

因信号电压与轮毂电机转矩 T_e 呈线性比例关系^[19], 即 $T_e = PU_{s0}$ 。由式(3)知步进电机转速越大, 轮毂电机转动初始时刻控制信号电压越大, 则轮毂电机驱动转矩也越大, 且轮毂电机驱动力 F_l 与 T_e 关系为^[22]

$$F_l = \frac{1}{r} \left(P \frac{2n_l t_0}{10 + 2n_l t_0} - M_{jl} \right) \tag{4}$$

式中 P ——常数

M_{jl} ——各轮所受阻矩, 假设各轮 M_{jl} 相等且为常值

下角 l 为 1、2、3、4, 分别代表左前轮、右前轮、左后轮及右后轮。

另外, 单轮及整机受力分析如图 3 所示, 以底盘几何中心为原点 O 建立车辆坐标系 XOY ; 各轮胎驱动力 F 沿 X 、 Y 两个方向分解为 F_{lx} 与 F_{ly} , 轮胎驱动力转移到偏置轴处后(图 3a), 各偏置轴处所受转矩为 M_l (图 3b)。底盘所受纵向合力 F_X 、横向合力 F_Y 、转矩 M_O 分别为

$$F_X = \sum_{l=1}^4 F_l \cos \delta_l \tag{5}$$

$$F_Y = \sum_{l=1}^4 F_l \sin \delta_l \tag{6}$$

$$M_O = \sum_{l=1}^4 M_l + \frac{B}{2} \sum_{l=1}^4 F_l \cos \delta_l + \frac{L}{2} \sum_{l=1}^4 F_l \sin \delta_l \tag{7}$$

式中 δ_l ——各偏置臂转角, $(^\circ)$

L ——车架纵向长度, m

B ——车架横向长度, m

同时结合式(4)可知底盘模式切换的受力稳定性受步进电机转速影响。

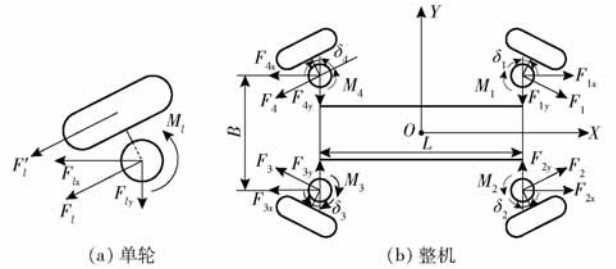


图 3 柔性底盘受力示意图

Fig. 3 Force diagrams of flexible chassis

综上可知, 柔性底盘模式切换时偏置臂转向精度和受力稳定性受锁紧电压和步进电机转速影响; 为提升转向精度及稳定性, 需通过试验探明二者对转向精度及稳定性的影响, 并对锁紧电压和转速进行优化匹配。

3 试验方案

3.1 测试装置及仪器设备

采用自制柔性底盘整机试验台进行试验, 柔性底盘与试验台的示意图及实物如图 4 所示。所用仪器设备有: TJL-1 型力传感器(蚌埠天光传感器公司, $0 \sim 500\text{ N}$)、22HP-10 型精密多圈电位器(日本 SAKAE 公司, $0 \sim 5\text{ k}\Omega$)、USB2852 型数据采集卡(北

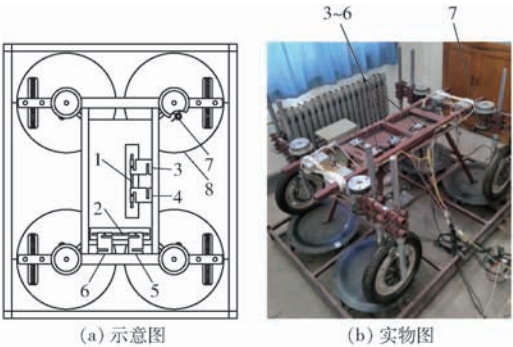


图 4 柔性底盘试验台示意图及实物图

Fig. 4 Schematic and object of flexible chassis test bench
1. 限位槽 a 2. 限位槽 b 3~6. 力传感器 7. 精密多圈电位器
8. 水平转盘

京阿尔泰科技公司)、610H 型研华工控机(研华科技公司)。

如图 4a 所示,柔性底盘各偏置轴处分别装一精密多圈电位器以测量偏置臂转角;4 个力传感器一端固定于车架,另一端插入固定于试验台架的限位槽 1、2 中,3、4 与 5、6 分别检测底盘横向和纵向受力情况;4 个水平转盘分别支撑 4 个电动轮。

3.2 试验设计

试验选取电磁摩擦锁锁紧电压(2~8 V)与转向电机步进电机转速(15~180 r/min)为试验因素,以底盘整机所受纵向力、横向力、中心 O 所受转矩以及各偏置臂的最大转角误差为试验指标,采用二元二次通用旋转组合试验设计,探明各因素对模式切换综合效果影响,同时建立因素与综合指标间的回归方程,并进行控制参数综合寻优。试验因素编码表如表 1 所示。

3.3 试验方法

如图 4b 所示,通过水平转盘的转动可模拟柔性底盘的路面行驶状态,但因模式切换是在原地进行,故将水平转盘通过其下方制动盘制动,以使水平盘相对于地面静止。试验初始时刻,开启数据采集系统,底盘处于准备模式,启动模式切换程

序后,步进电机便在控制器命令下完成转动,使偏置转向轴机构完成转向跟踪动作,底盘完成横行、原地回转的切换。4 个力传感器检测底盘受力情况,4 个转角传感器分别检测各偏置臂的转角。中心 O 的转矩根据力传感器值及 O 到各力方向的垂直距离计算。试验完毕停止保存,恢复到准备模式后进行下一次试验。

表 1 试验因素与编码
Tab.1 Experimental factors and codes

编码	因素	
	锁紧电压 x_1 /V	步进电机转速 x_2 /(r·min ⁻¹)
1.414	8.00	180.00
1	7.12	156.00
0	5.00	97.50
-1	2.88	39.00
-1.414	2.00	15.00

4 结果与分析

试验设计及结果如表 2 所示, X_1 、 X_2 为因素编码值。共 13 组试验,每组试验重复 5 次取平均值,横行与原地回转切换时纵向力、横向力、转矩、转角误差 4 个指标分别记为 y_q 、 Y_q ($q=1,2,3,4$)。

表 2 二元二次旋转组合试验设计及结果
Tab.2 Binary quadratic rotation combination test design and results

试验 序号	X_1	X_2	横行					原地回转				
			y_1 /N	y_2 /N	y_3 /(N·m)	y_4 /(°)	Y_H	Y_1 /N	Y_2 /N	Y_3 /(N·m)	Y_4 /(°)	Y_A
1	-1	-1	18.01	20.88	5.99	2.52	0.634 6	22.01	22.82	4.98	2.12	0.519 5
2	1	-1	26.65	36.34	12.81	3.64	0.266 6	29.65	33.02	9.89	2.35	0.302 2
3	-1	1	38.84	39.22	12.29	3.45	0.244 9	22.04	32.96	5.84	1.85	0.480 8
4	1	1	40.52	42.51	31.38	3.42	0.122 5	35.82	38.08	28.61	2.41	0.087 0
5	-1.414	0	15.41	36.62	9.47	3.25	0.388 9	16.11	33.99	3.53	1.76	0.557 4
6	1.414	0	20.74	47.82	24.73	3.54	0.164 7	31.74	41.88	21.81	2.23	0.165 4
7	0	-1.414	35.16	14.04	11.97	2.52	0.592 9	30.16	19.84	6.89	2.68	0.361 6
8	0	1.414	55.22	35.58	21.87	3.51	0.154 8	37.22	29.61	18.91	2.36	0.202 9
9	0	0	10.58	13.79	16.86	0.98	0.925 3	6.04	5.93	16.88	0.99	0.925 1
10	0	0	10.04	12.26	16.98	1.32	0.875 5	6.58	6.22	14.95	1.05	0.912 7
11	0	0	11.32	11.41	15.21	1.42	0.868 3	7.32	5.37	14.41	1.12	0.909 3
12	0	0	10.42	12.06	15.34	1.02	0.938 1	7.42	7.01	12.56	1.03	0.939 0
13	0	0	12.36	13.24	14.21	1.11	0.913 8	8.36	6.34	13.23	1.03	0.905 1

4.1 模式切换综合效果熵值法评价

因本试验评价指标较多,故采用较为客观的熵值法^[23],将 2 种模式各指标构建综合评判指标,分别记为 Y_H 、 Y_A 。本文有 n ($n=13$) 组试验 m ($m=4$) 个指标,用 λ_{ij} 表示第 i 组试验第 j 个指标值(i 为 1,2,⋯, n ; j 为 1,2,⋯, m),即纵向力、横向力、转矩、转角误差的试验值。

各指标值越小则模式切换效果越好,故用负向

指标公式进行标准化^[23],标准化值为

$$\lambda'_{ij} = \frac{\max\{\lambda_{1j}, \cdots, \lambda_{nj}\} - \lambda_{ij}}{\max\{\lambda_{1j}, \cdots, \lambda_{nj}\} - \min\{\lambda_{1j}, \cdots, \lambda_{nj}\}} \quad (8)$$

各指标权重为

$$P_{ij} = \lambda'_{ij} / \sum_{i=1}^n \lambda'_{ij} \quad (9)$$

第 j 项指标的熵值为

$$e_j = -k \sum_{i=1}^n P_{ij} \ln P_{ij} \quad (k=1/\ln n) \quad (10)$$

第 j 项指标的信息熵冗余度为

$$d_j = 1 - e_j \tag{11}$$

第 j 项指标的权重为

$$w_j = d_j / \sum_{j=1}^m d_j \tag{12}$$

模式切换效果的综合评价指标值为

$$s_i = \sum_{j=1}^n w_j P_{ij} \tag{13}$$

通过式(13)得出横行切换与原地回转切换效果综合评价指标值即为表2中 Y_H 、 Y_A 。

4.2 综合评价指标回归模型及响应面分析

4.2.1 综合评价指标回归模型

用 Design-Expert 8.0 将表2中综合评价指标 Y_H 、 Y_A 值进行回归,得到横行切换和原地回转切换的回归方程分别为

$$Y_H = 0.9055 - 0.1012X_1 - 0.1440X_2 + 0.06138X_1X_2 - 0.3155X_1^2 - 0.2676X_2^2 \quad (R^2 = 0.9936) \tag{14}$$

$$Y_A = 0.9187 - 0.1455X_1 - 0.05975X_2 - 0.04395X_1X_2 - 0.2717X_1^2 - 0.3155X_2^2 \quad (R^2 = 0.9978) \tag{15}$$

通过 F 检验的方法得到回归模型的方差分析如表3所示,横行切换与原地回转切换的回归模型

表3 综合评价指标回归模型方差分析
Tab.3 Variance analysis for regression model of comprehensive evaluation index

模式	来源	平方和	自由度	均方	F	P
横行切换	模型	1.32	5	0.26	216.35	<0.0001
	X_1	0.082	1	0.082	67.22	<0.0001
	X_2	0.17	1	0.17	136.47	<0.0001
	X_1X_2	0.015	1	0.015	12.44	0.0096
	X_1^2	0.69	1	0.69	568.61	<0.0001
	X_2^2	0.50	1	0.50	410.07	<0.0001
	残差	0.0085	7	0.0012		
	失拟	0.0047	3	0.0016	1.66	0.3113
	纯误差	0.0038	4	0.0095		
	总计	1.33	12			
原地回转切换		$R^2 = 0.9936$		$R^2_{Adj} = 0.9890$		
	模型	1.26	5	0.25	293.87	<0.0001
	X_1	0.17	1	0.17	368.84	<0.0001
	X_2	0.029	1	0.029	54.46	0.0002
	X_1X_2	0.0078	1	0.0078	42.15	0.0003
	X_1^2	0.51	1	0.51	414.35	<0.0001
	X_2^2	0.68	1	0.68	713.72	<0.0001
	残差	0.0027	7	0.0074		
	失拟	0.002	3	0.0037	3.49	0.1295
	纯误差	0.0076	4	0.0042		
	总计	1.26	12			
		$R^2 = 0.9978$		$R^2_{Adj} = 0.9963$		

均极显著($P < 0.01$),失拟项均不显著($P > 0.05$),且综合指标回归模型的确定系数分别为0.9936和0.9978,可见模型拟合程度较高;两回归方程各项系数均显著($P < 0.05$),表明模型合理;另外,锁紧电压与转速及其交互作用对模式切换效果均有极显著影响($P < 0.01$)。

4.2.2 模式切换效果响应面分析

利用 Design-Expert 8.0 得到模式切换综合评价指标关于锁紧电压与步进电机转速的响应曲面及等高线图如图5、6所示。由图5a可得,随着锁紧电压与转速的增大,在一定范围内响应值均呈现先增大后减小的趋势;由图5b可得,响应面的峰值处于试验因素取值范围内,且在电压4~5V,转速70~100 r/min 内时,横行模式切换效果最佳。

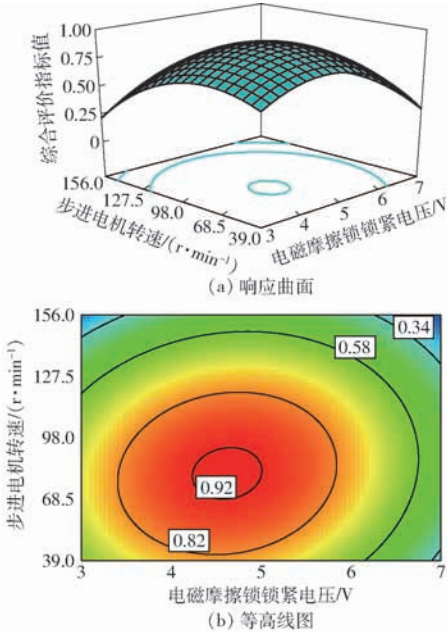


图5 锁紧电压与转速对横行切换效果影响的响应曲面及等高线图

Fig.5 Response surface and contour plots of locking voltage and speed influence on cross switching effect

图6a显示的原地回转模式切换效果响应曲面亦为凸形,由图6可看出,试验范围内锁紧电压引起的响应值变化幅度大于步进电机转速,图6b表明响应面的峰值在电压3.5~4.5V,转速80~110 r/min 内。图5与图6响应面皆为凸形是由于锁紧电压过低或过高,使电磁摩擦锁锁紧力矩过小或过大,使转向精度变差造成的,同样,当步进电机转速过低或过高,将使底盘受力波动增加,稳定性下降,这与上述第2节模式切换过程的分析一致。

4.3 控制参数优化及试验验证

利用 Design-Expert 的优化求解功能,以综合评价指标回归方程(14)与(15)为目标函数,以2个因

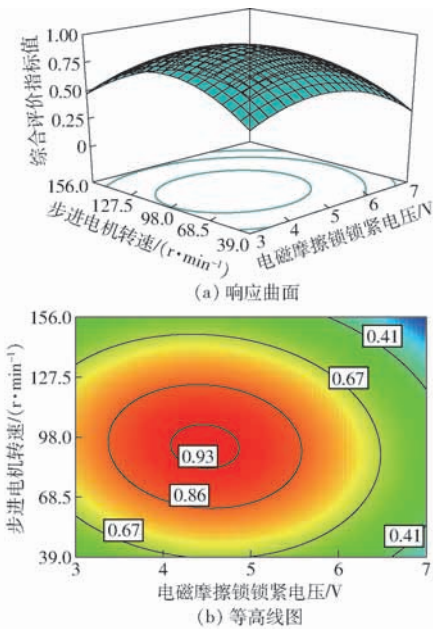


图6 锁紧电压与转速对原地回转切换效果影响的响应曲面及等高线图

Fig.6 Response surface and contour plots of locking voltage and speed influence on in-place rotation switching effect

素的试验范围为边界约束条件,即在步进电机转速15~180 r/min、驱动电压2~8 V内进行优化求解,从而得到2种模式切换时,最优的步进电机转速以及电磁摩擦锁紧电压:横行为81 r/min、4.60 V;原地回转为91 r/min、4.41 V。

在上述优化组合条件下进行验证试验,检测切换时底盘纵向力、横向力、转矩及转角误差,每组试验重复5次取均值,然后转换为综合评价指标,得到

试验结果如表4所示,计算值与试验值最大相对误差为4.73%,可见获取的最优步进电机转速及电磁摩擦锁紧电压是合理的。

表4 最优组合下综合评价模型计算值与试验值
Tab.4 Calculations of comprehensive evaluation model and experimental values under optimal combination

参数	横行	原地回转
计算值	0.935 9	0.939 6
试验值	0.891 6	0.914 7
相对误差/%	4.73	2.65

5 结论

(1)通过理论分析得出了影响柔性底盘模式切换的关键因素为转向电桥步进电机转速与电磁摩擦锁紧电压,并应用熵值法构建了转速与电压对模式切换效果影响的评价指标,采用二元二次通用旋转组合试验,得出了底盘横行与原地回转切换时综合评价指标关于两个因素的回归模型,且均极显著($P < 0.01$)。

(2)响应面试验优化结果表明,柔性底盘横行与原地回转切换时的最优转向电桥步进电机转速与电磁摩擦锁紧电压分别为81 r/min、4.60 V和91 r/min、4.41 V。

(3)试验验证表明,横行与原地回转模式切换最优控制参数的模型理论值与试验值最大相对误差为4.73%,最优参数合理,可为农用柔性底盘运动控制及推广应用提供参考。

参 考 文 献

1 肖体琼,何春霞,陈巧敏,等. 基于机械化生产视角的中国蔬菜成本收益分析[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(5):75-82. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150512&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.05.012.
XIAO Tiqiong, HE Chunxia, CHEN Qiaomin, et al. Cost-benefit analysis of vegetable production based on agricultural mechanized production[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(5):75-82. (in Chinese)

2 齐飞,魏晓明,张跃峰. 中国设施园艺装备技术发展现状与未来研究方向[J]. 农业工程学报,2017,33(24):1-9.
QI Fei, WEI Xiaoming, ZHANG Yuefeng. Development status and future research emphase on greenhouse horticultural equipment and its relative technology in China[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(24):1-9. (in Chinese)

3 刘继展. 温室采摘机器人技术研究进展分析[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(12):1-18. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171201&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.12.001.
LIU Jizhan. Research progress analysis of robotic harvesting technologies in greenhouse[J/OL]. Transactivons of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(12):1-18. (in Chinese)

4 REDPATH D A G, MCILVEEN-WRIGHT D, KATTAKAYAM T, et al. Battery powered electric vehicles charged via solar photovoltaic arrays developed for light agricultural duties in remote hilly areas in the Southern Mediterranean region[J]. Journal of Cleaner Production, 2011, 19(17-18):2034-2048.

5 BECHAR A, VIGNEAULT C. Agricultural robots for field operations. Part 2: Operations and systems[J]. Biosystems Engineering, 2017, 153:110-128.

6 TABILE R. Design of the mechatronic architecture of an agricultural mobile robot[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2010, 43(18):717-724.

- 7 周俊,陈钦,梁泉. 基于强化学习的农业移动机器人视觉导航[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(2):53-58. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140210&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.02.010.
ZHOU Jun, CHEN Qin, LIANG Quan. Vision navigation of agricultural mobile robot based on reinforcement learning[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2):53-58. (in Chinese)
- 8 张华,郑加强. 4WD型农药喷雾机液压四驱底盘直行同步控制方法比较及验证[J]. 农业工程学报,2016,32(23):43-50.
ZHANG Hua, ZHENG Jiaqiang. Comparison of straight line driving synchronous control methods and validation of 4WD sprayer chassis with hydraulic power[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(23):43-50. (in Chinese)
- 9 刘平义,彭凤娟,李海涛,等. 丘陵山区农用自适应调平底盘设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(12):42-47. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171205&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.12.005.
LIU Pingyi, PENG Fengjuan, LI Haitao, et al. Design and experiment of adaptive leveling chassis for hilly area[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12):42-47. (in Chinese)
- 10 张铁民,黄翰,黄鹏焕. 电动轮式移动小车控制系统设计与试验[J]. 农业工程学报,2014,30(19):11-18.
ZHANG Tiemin, HUANG Han, HUANG Penghuan. Design and test of drive and control system for electric wheeled mobile car[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(19):11-18. (in Chinese)
- 11 邹福星,李建平,何相逸,等. 电动自走式温室水体修复植物收获机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(6):61-66. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160609&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.06.009.
ZOU Fuxing, LI Jianping, HE Xiangyi, et al. Design and experiment of self-propelled water body restoration plants harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(6):61-66. (in Chinese)
- 12 吴伟斌,廖劲威,洪添胜,等. 山地果园轮式运输车车架结构分析与优化[J]. 农业工程学报,2016,32(11):39-47.
WU Weibin, LIAO Jingwei, HONG Tiansheng, et al. Analysis and optimization of frame structure for wheeled transporter in hill orchard[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(11):39-47. (in Chinese)
- 13 GAT G, GAN-MOR S, DEGANI A. Stable and robust vehicle steering control using an overhead guide in greenhouse tasks[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2016, 121:234-244.
- 14 YE Y, HE L, ZHANG Q. Steering control strategies for a four-wheel-independent-steering bin managing robot[J]. IFAC-PapersOnLine, 2016, 49(16):39-44.
- 15 JIANG D, LI D, WANG S, et al. Additional yaw moment control of a 4WIS and 4WID agricultural data acquisition vehicle[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2015, 12(6):78-88.
- 16 BACKMAN J, PIIRAINEN P, OKSANEN T. Smooth turning path generation for agricultural vehicles in headlands[J]. Biosystems Engineering, 2015, 139:76-86.
- 17 路敌,郭康权. 柔性底盘的转向运动模型[J]. 农机化研究,2011,33(4):219-222.
LU Di, GUO Kangquan. Divertical motion model of flexible chassis[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 33(4):219-222. (in Chinese)
- 18 路敌. 温室作业机的柔性底盘及其控制系统研究与开发[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2011.
LU Di. Research and development for flexible chassis and its control system of conservatory work machines[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2011. (in Chinese)
- 19 宋树杰. 农用柔性底盘的运动特性与控制策略研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2017.
SONG Shujie. Research on kinematical features and control strategy of agricultural flexible chassis[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2017. (in Chinese)
- 20 宋树杰,李翊宁,瞿济伟,等. 柔性底盘性能检测试验台设计与应用[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(2):77-83. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160211&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.02.011.
SONG Shujie, LI Yining, QU Jiwei, et al. Development and application of test bench for flexible chassis[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(2):77-83. (in Chinese)
- 21 杨露,郭康权,丁新民. 基于电桥电路的温室作业柔性底盘转向控制系统的设计[J]. 农机化研究,2013,35(9):151-155.
YANG Lu, GUO Kangquan, DING Xinmin. The steering control system design of flexible chassis for conservatory work based on bridge circuit[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013, 35(9):151-155. (in Chinese)
- 22 宋树杰,瞿济伟,李翊宁,等. 农用车底盘偏置转向轴驱动轮运动与动力特性试验[J]. 农业工程学报,2015,31(23):28-34.
SONG Shujie, QU Jiwei, LI Yining, et al. Experiment on movement and dynamic property of driving wheel with offset steering shaft for agricultural vehicle[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(23):28-34. (in Chinese)
- 23 邱苑华. 管理决策熵学及其应用[M]. 北京:中国电力出版社,2011.